



TITLE:

## 研究室紹介

AUTHOR(S):

---

CITATION:

研究室紹介. Cue 2017, 38: 16-35

ISSUE DATE:

2017-09

URL:

<https://doi.org/10.14989/227454>

RIGHT:

## 研究室紹介

このページでは、電気関係研究室の研究内容を少しずつシリーズで紹介して行きます。今回は下記のうち太字の研究室が、それぞれ1つのテーマを選んで、その概要を語ります。

(☆は「大学の研究・動向」、# は「高校生のページ」、\* は「新設研究室紹介」に掲載)

### 電気関係研究室一覧

#### 工学研究科 (大学院)

##### 電気工学専攻

##### 先端電気システム論講座 (引原研)

システム基礎論講座自動制御工学分野 (萩原研)

システム基礎論講座システム創成論分野

生体医工学講座複合システム論分野 (土居研)

生体医工学講座生体機能工学分野 (小林研)

##### 電磁工学講座超伝導工学分野 (雨宮研)

電磁工学講座電磁回路工学分野 (和田研)

##### 電磁工学講座電磁エネルギー工学分野 (松尾研)

優しい地球環境を実現する先端電気機器工学講座  
(中村武研)\*

##### 電子工学専攻

##### 集積機能工学講座

##### 電子物理工学講座極微電子工学分野 (白石研)

電子物理工学講座応用量子物性分野 (竹内研)

電子物性工学講座半導体物性工学分野 (木本研)

電子物性工学講座電子材料物性工学分野 (山田研)

##### 量子機能工学講座光材料物性工学分野 (川上研)

量子機能工学講座光量子電子工学分野 (野田研)

量子機能工学講座量子電磁工学分野 (北野研)

##### 光・電子理工学教育研究センター

##### ナノプロセス部門ナノプロセス工学分野

デバイス創成部門先進電子材料分野 (藤田研)

#### 情報学研究科 (大学院)

##### 知能情報学専攻

知能メディア講座言語メディア分野 (黒橋研)

知能メディア講座画像メディア分野

##### 通信情報システム専攻

通信システム工学講座デジタル通信分野 (原田研)

通信システム工学講座伝送メディア分野 (守倉研)

通信システム工学講座知的通信網分野 (大木研)

集積システム工学講座情報回路方式分野 (佐藤高研)

集積システム工学講座大規模集積回路分野 (小野寺研)#

集積システム工学講座超高速信号処理分野 (佐藤亨研)

##### システム科学専攻

システム情報論講座論理生命学分野 (石井研)

システム情報論講座医用工学分野 (松田研)

#### エネルギー科学研究科 (大学院)

##### エネルギー社会・環境科学専攻

エネルギー社会環境学講座エネルギー情報学分野 (下田研)

##### エネルギー基礎科学専攻

エネルギー物理学講座電磁エネルギー学分野 (中村祐研)

##### エネルギー応用科学専攻

エネルギー材料学講座エネルギー応用基礎学分野 (土井研)☆

エネルギー材料学講座プロセスエネルギー学分野 (白井研)

#### エネルギー理工学研究所

エネルギー生成研究部門粒子エネルギー研究分野 (長崎研)

エネルギー生成研究部門プラズマエネルギー研究分野 (水内研)

エネルギー機能変換研究部門複合系プラズマ研究分野

#### 生存圏研究所

##### 中核研究部

生存圏診断統御研究系レーダー大気圏科学分野 (山本研)

生存圏診断統御研究系大気圏精測診断分野

生存圏開発創成研究系宇宙圏航行システム工学分野 (山川研)

生存圏開発創成研究系生存科学計算機実験分野 (大村研)

生存圏開発創成研究系生存圏電波応用分野 (篠原研)

#### 学術情報メディアセンター

コンピューティング研究部門ビジュアルライゼーション研究分野  
(小山田研)

教育支援システム研究部門遠隔教育システム研究分野 (中村裕研)

## 先端電気システム論講座（引原研究室）

<http://www-lab23.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

### 「高周波電力変換回路の実現にむけた取り組み」

昨今 SiC、GaN パワーデバイスが商品化されるに至り、電力変換回路設計は大きな転換期を迎えている。Si デバイスに比べて優れた性能が報告されており、低オン抵抗、高耐圧、低スイッチング損のデバイスが市販されるようになってきている。鉄道や自動車などをはじめとして、Si 半導体を SiC に置き換えることで電力変換回路の大幅な高効率化や小型化が実現され、世界中で研究開発が加速している。本研究室では、さらにその先を見据え、SiC や GaN パワーデバイスの性能を限界まで引き出す回路づくりに挑戦している。たとえば Si パワーデバイスでは難しい 10 MHz を超える高周波スイッチングが挙げられる。この実現にむけた取り組みを紹介する。

電力変換回路の動作周波数は一般的に 100 kHz 程度であり、10 MHz 以上になると現状の回路シミュレーションでは対応できず、シミュレーション環境を再構築する必要がある。本研究室ではデバイス物理に立ち返り、SiC ショットキーダイオード (SBD) や MOSFET のデバイスモデリングを行ってきた。実験値をフィッティングして得られる経験的モデルと異なり、デバイス物理に基づいたモデリングを行うことで高周波領域でもデバイス動作を記述することができる。またデバイス構造に由来するパラメータで構成されているため、スイッチング速度を制限しているデバイスパラメータを調べることができ、高周波で動かすためのデバイス設計論として半導体研究へフィードバックすることができる。また、トランスなどの受動素子についても高周波領域での振る舞いをモデル化する必要があり、半導体素子だけでなく回路素子ひとつひとつに目をむけていく必要がある。回路パターンにおける寄生インダクタンスの適切な評価も重要である。これらを体系的に調べていくことで、たとえば図 1 に示すように SiC SBD の高周波大電力正弦波 (10 MHz, 200 V<sub>pp</sub>) に対するスイッチング結果を、回路シミュレーションにより精度よく再現することに成功した [1]。また、図 2 には SiC MOSFET と SiC SBD を用いた昇圧回路におけるスイッチング波形 (5 MHz) を示す [2]。回路シミュレーションにより実験波形を精度よく再現することができた。これは半導体デバイスモデルの高精度化だけでなく、受動素子の適切なモデリングによるところも大きい。

これらの研究を実施するにあたり、回路分野だけの研究ではなく、様々な分野の研究者と議論を続けている。たとえば、デバイスモデル作成にあたっては半導体物理に精通している必要がある。実際の計算にあたっては複雑な非線形方程式を高速に求解する必要があり、モデル式の適切な記述や非線形方程式の高度な取り扱いが必要である。スイッチング波形の高速化にともない、回路の寄生成分によるリングングや、不適切な回路パターンでの放射ノイズなどが問題となり、これらはマイクロ波工学が得意とする分野である。トランスなどの磁性体材料では漏れ磁束を制御するため磁性体形状の工夫が必要である。他研究室と連携をはかりながら、次世代パワーデバイスを用いた電力変換回路の限界に対して学術的に線引きするとともに、その限界を押し上げようと試みている。

[1] 前田凌佑, 奥田貴史, 引原隆士, 電気学会全国大会, 富山大学, 4-012, 2017 年 3 月 15 日。

[2] T. Okuda et al., 4th IEEE Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications, Arkansas, pp.101-104, 2016.

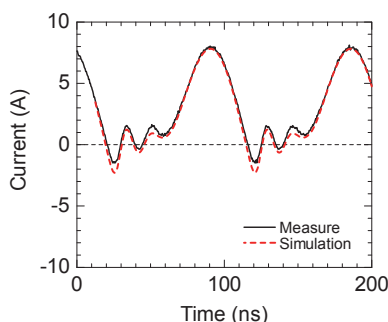


図 1 SiC SBD の整流特性の測定結果とシミュレーション結果の比較 (10 MHz, 200 V<sub>pp</sub>)

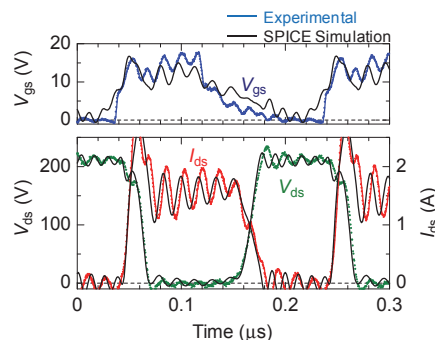


図 2 昇圧回路における SiC MOSFET のスイッチング特性 (5 MHz)

## 電磁工学講座 超伝導工学分野（雨宮研究室）

<http://www.asl.kuee.kyoto-u.ac.jp/index.html>

## 「高温超伝導線の常伝導転移現象」

超伝導線には銅線に比べてずっと高い電流密度で電流を流すことができるために、銅線に比べて格段に高い磁界を発生するマグネット（電磁石）を作ることができます。その応用例が、MRI 装置であり、磁気浮上列車です。現在実用化されている MRI 装置や磁気浮上列車のマグネットには、ニオブチタン合金などの金属の超伝導線が用いられています。これらの金属系超伝導線は低温超伝導線とも呼ばれ、超伝導状態にするためには、例えば液体ヘリウムの中に漬けて 4.2 K 程度まで冷却する必要があります。一方、銅酸化物系の超伝導材料による高温超伝導線を用いたマグネットの研究も近年活発化しています。高温超伝導線は数十ケルビンという比較的高い温度で超伝導状態となるため、低温超伝導線に比べて冷却の手間が軽減されます。高温超伝導線を用いたマグネットでは、超伝導コイルを冷凍機の数ケルビンから数十ケルビンまで冷えるコールドヘッドと接続して熱伝導で冷却することができます。

このような伝導冷却高温超伝導コイルにおいて、冷却の不具合、様々な擾乱、超伝導線の特性劣化などによる常伝導転移現象についての知見を得ることは、その実用化のために大変重要です。我々の研究室は、図 1 に示したような、最大 5 T の磁界のもとで、最大で直径 20 cm × 高さ 20 cm 程度の試料超伝導コイルや超伝導線を最低 10 K 程度まで冷却し、最大 500 A の電流を通電できる装置を有しています。この装置を用いて、伝導冷却された高温超伝導線や高温超伝導コイルの常伝導転移現象について研究しています。図 2 は希土類銅酸化物を用いた高温超伝導線を伝導冷却し 64 A の電流を流し、これに過渡的な熱擾乱を局所的に与え、その際の高温超伝導線の温度変化を観測した実験結果の一例です。過渡的な熱擾乱は、医療用などの粒子加速器において粒子ビームが誤ってコイルに入射するビーム損失などを模擬したものです。熱擾乱が小さい場合は自然に超伝導状態を回復しますが、ある閾値を超えた熱擾乱が加わると超伝導線の温度は上昇し、超伝導線全長にわたって超伝導状態が壊れるクエンチという事象につながってしまいます。クエンチを放置すると、常伝導転移した超伝導線において発生するジュール発熱により超伝導線や超伝導コイルは最終的に焼損してしまう恐れがありますが、図に示した例では、時刻 8 - 10 秒程度で流れる電流を遮断すれば、最大温度は 200 K 程度で抑えられ、超伝導線（コイル）を焼損から保護できることを示しています。



図 1 伝導冷却超伝導線・コイルの特性評価装置（最大磁界 5 T、最低温度 10 K、最大電流 500 A）

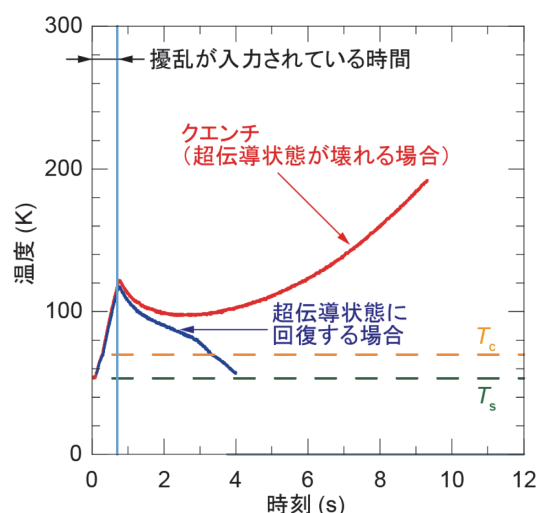


図 2 伝導冷却された超伝導線に熱擾乱を加えた際の温度変化（通電電流 64 A）



## 電磁工学講座 電磁エネルギー工学分野（松尾研究室）

<http://fem.kuee.kyoto-u.ac.jp/EMEE-lab/index.html>

## 「鉄芯材料のマルチフィジクスモデルを用いた磁気特性の応力依存性の予測」

誘導モータに対してトップランナー基準が設定されるなど、モータの効率向上が課題となっている中で、モータに用いられる鉄芯材料特性の応力依存性の重要度が増している。すなわち、モータの製造過程で焼き嵌めなどにより鉄芯材料に加わる機械的応力により鉄損が増加し、そのことがモータ性能を制約する要因となっている。そこで、鉄芯材料磁気特性の応力依存性の測定が進められている。しかし、これまで応力特性の有効なモデル化手法が存在していなかったため、鉄芯のベクトル磁気特性の応力依存性を表現するためには膨大な計測データを要していた。

本研究室では、鉄芯材料の基礎的な物性データからその磁気特性を測定によらずに予測する物理的モデル化手法として集合磁区モデル [1] を開発してきた。本手法は、磁区構造のモデル化とエネルギー極小化に基づいており、磁化過程を左右する各種要因（磁気異方性、外部磁界、減磁界など）をエネルギーの形で陽に考慮することが可能である。したがって、磁気弾性エネルギーの項を加算することにより、機械的応力が磁気特性に及ぼす影響を考慮することができる。

機械的応力により増加する損失はヒステリシス損である。これは、圧縮応力が磁気異方性の効果をもたらし、応力印加方向に向く磁区が減少することから、応力方向のピンニング磁界が増加するためと考えられる。したがって、機械的応力が磁区構造に及ぼす影響をエネルギー的に表現するとともに、磁壁移動に伴うピンニング磁界を表現できればよい。そこで、無応力状態における磁気特性からピンニング磁界の密度関数を推測し、これを集合磁区モデルに組み込むことにより応力依存解析を可能にした [2]。図 1 (a) は図の水平方向に圧縮応力を印加した際に生じる磁区分布の模式図である。水平方向には磁化しにくくなるため、磁化が応力と異なる方向の磁区が増加している。図 1 (b) は 40MPa の圧縮応力による鉄損の増加を示しており、計測結果と一致する結果を得ている。圧縮応力による透磁率の減少についても本モデルで再現される。また、本手法はベクトル励磁下における異方的な磁気特性および磁歪特性の再現にも成功している [3]。今後、不純物密度などの材料データからピンニング磁界分布を予測する技術を開発し、磁性材料シミュレータとして実用化することを目指している。

文献 [1] S. Ito, et.al. J. Appl. Phys., 117, 17D126, 2015. [2] 伊藤, 他, 電学マグネティックス研資, MAG-16-083, 2016. [3] S. Ito, et.al., IEEE Trans. Magn., 52, 2002604, 2016.

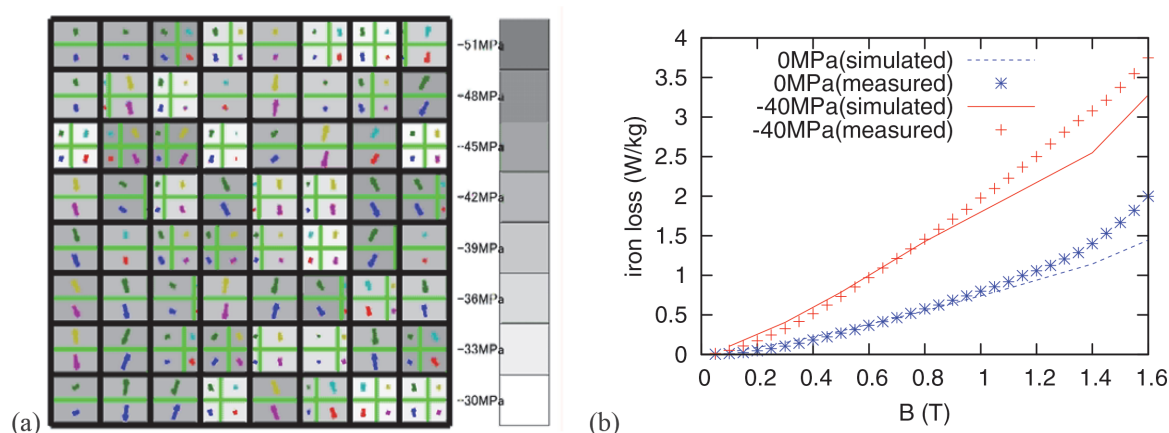


図 1 集合磁区モデルによる計算結果：(a) 磁区と応力の分布の模式図、(b) 無応力（0MPa）時と圧縮応力（-40Mpa）印加時の鉄損

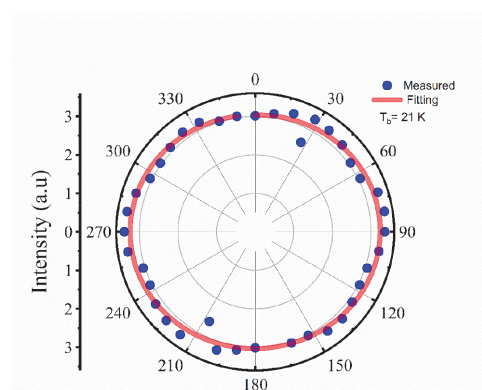
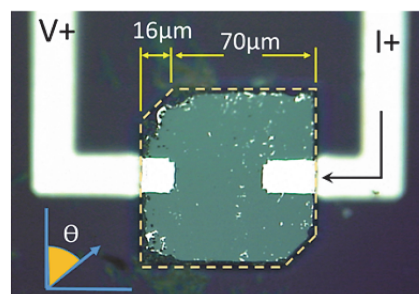
## 集積機能工学講座

<http://sk.kuee.kyoto-u.ac.jp>

## 「高温超伝導体テラヘルツ光源からの円偏波発振」

電波と光の中間の周波数に位置するテラヘルツ (THz) 領域はこれまでに 1 mW を超える実用的な強度を持つ固体光源が得られていませんでした。マイクロ波領域のようにキャリアのダイナミクスを利用しようとしても半導体の易動度の上限から周波数が制約され、LED のように量子効果を利用する場合にもそのエネルギーは 10 ケルビン以下の温度に相当するので、極低温が必要であるからです。超伝導体のトンネル接合であるジョセフソン接合では、交流ジョセフソン効果により直流電圧を交流電流に変換することが可能であるだけでなく、超伝導ギャップにより集団励起状態が保護されるので、散逸の少ないコヒーレントな電磁波が励起されることが期待されてきました。2007 年に高温超伝導体  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$  ( $\text{Bi2212}$ ) からの結晶外への THz 波放射が初めて観測された後の研究により、単色でありながら 0.3-2.4 THz という広い可変周波数範囲、最大 0.6 mW という高い放射効率という際立った特性が現在までに報告されています。空間への電磁波の放射は、多数の固有ジョセフソン接合で励起されたジョセフソンプラズマ振動が同期することによってメサ構造表面に誘起されたマクロな電流がもたらす振動磁場が空間の電磁場と結合することによって生じます。このことは、高温超伝導テラヘルツ光源の放射特性の制御には携帯電話に用いられているパッチアンテナの手法が応用できるということを示しています。マイクロ波領域では、パッチアンテナを用いて円偏波を放射させ、人工衛星との通信や車間測定レーダーに応用されています。円偏波電磁波は、振動電場の直交成分の位相が 90 度ずれており、伝搬面へ投影した電場ベクトルの先端が円軌道を描いています。私たちは、パッチアンテナ理論を高温超伝導体テラヘルツ光源に応用することにより、円偏波のテラヘルツ電磁波を発生させることができました。

図に、パッチアンテナ理論を参考にして設計した高温超伝導体テラヘルツ光源のメサ構造の写真および最大の円偏波度の条件での偏波強度特性のデータを示します。メサ構造は正方形の角を取った形をしており、もともとの正方形の面積と角の部分の面積の比が、アンテナの Q 値に関して特定の関係を満たす場合、円偏波が放射されるとされています。前述のとおり、高温超伝導テラヘルツ光源は単独の素子で発信周波数を広く変化させることができるので、円偏波度はバイアス条件に依存します。パッチアンテナは外部から電磁波が供給されますが、高温超伝導テラヘルツ光源では、アンテナ自身が電磁波を供給することになるので、円偏波度のバイアス条件依存性から、内部の励起モード、ひいては同期機構に関する知見を得ることができます。円偏波のテラヘルツ波は、将来的な移動体間の超高速通信や円二色性分光に応用できる有用な技術ですが、スケールアップが可能なモノリシックな (1 枚板の) デバイスでは、高い円偏波度が得られていませんでした。本研究で得られた 99.7% という円偏波度は既存のテラヘルツ連続光源と比べて最高の値であり、高温超伝導テラヘルツ光源の有用性がまた一つ増えたことになります。



図：(上) 円偏波を放射する高温超伝導体テラヘルツ光源メサ構造の写真。(下) 偏光子透過強度の極座標プロット。

## 電子物理工学講座 極微電子工学分野（白石研究室）

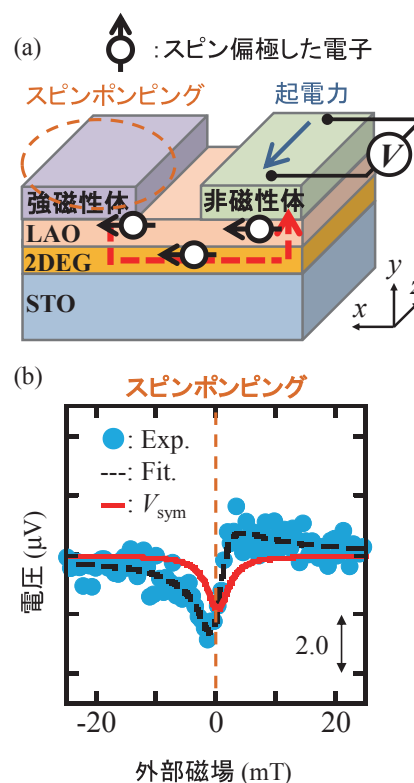
<http://cmp.kuee.kyoto-u.ac.jp>

### 「酸化物スピントロニクス領域の開拓」

電子が持つ電氣的性質「電荷」と磁氣的性質「スピン」を同時に制御する分野をスピントロニクスと呼びます。量子力学を扱うこの分野は微小サイズのデバイスと大変相性が良く、微細加工技術が発達した近年急速に発展してきた研究分野です。スピンの向きが揃った、あるいは偏った電子の流れを「スピン流」と呼びますが、スピン流は電流とは異なり保存されず、ある距離を流れると減衰します。これは、物質中の電子の軌道運動とスピンとの相互作用である「スピン軌道相互作用」に代表される効果によってスピンがランダムな方向に向くことに起因します。スピン流が保存される距離の指標を「スピン拡散長」と呼びますが、この長さは材料毎に大きく変化します（凡そ数ナノメートルから数ミクロン）。その為、スピントロニクスを利用したデバイス開発には、そのデバイスに適した材料の開発・探索が重要となります。スピンデバイスにおいて必要となる機能は主に①スピン流の伝搬・伝搬中の電子スピン方向の制御、②スピン流の検出、③スピン流の媒体への注入の3つです。それぞれ求められる役割は異なり、特に①と②はスピン拡散長がそれぞれ長いものと短いもの、一般的に正反対の材料が求められます。②に短いスピン拡散長が求められる理由としては、スピン軌道相互作用によって散乱を受けた電子は電流として検出できるためです。散乱方向はスピン流とスピンの向きに直交し、ホール効果と類似することからこの効果を「逆スピンホール効果」と呼びます。

我々の研究室では酸化物に形成される二次元電子系を上記①の候補材料として研究しています。LaAlO<sub>3</sub> (LAO) と SrTiO<sub>3</sub> (STO) は共に酸化物絶縁体ですが、それらを接合すると、その界面が恰も二次元平面であるかの如く振る舞う伝導層（二次元電子系、2DEG）となることが報告されています。この材料はスピントロニクスにおいて上記②の機能が低温にて報告されており、スピン拡散長が短いとされてきました。しかし、室温環境下では他の良好なスピン輸送媒体と同等のスピン拡散長を有することを我々の研究で明らかにしました。図 (a) のように LAO/STO 表面に強磁性体（スピン注入）電極と非磁性体（スピン検出）電極をそれぞれ作製します。強磁性体中の磁化の歳差運動を利用したスピン流生成法「スピンポンピング」を用いて LAO/STO 界面にスピン流を生成します。LAO/STO 界面内方向を流れるスピン流は非磁性体電極にも流れ込み、上記逆スピンホール効果によって起電力として観測されます（図 (b)）。これはつまり、強磁性体電極のスピン情報を非磁性体電極まで伝送しています（スピン輸送）。また、起電力の大きさを解析することでスピン拡散長を求めることができ、上記①で利用する上で十分な長さのスピン拡散長を有することが分かりました。以上の結果は酸化物界面に新たなスピン機能を付与するだけでなく、酸化物におけるスピントロニクス領域開発へとつながります。現在はこの長いスピン拡散長の起源の解明や、二次元電子系で期待されるスピン軌道相互作用の外部電界による変調を利用したスピン方向の制御を目指した研究を進めています。

参考文献：Ryo Ohshima *et al.*, “Strong evidence for d-electron spin transport at room temperature at a LaAlO<sub>3</sub>/SrTiO<sub>3</sub> interface” *Nature Materials* **16**, 609-614 (2017).



図：(a) スピン輸送実験の試料構造。(b) 観測される起電力。外部磁場の値はスピンポンピング条件を中心としている。



## 量子機能工学講座 光材料物性工学分野 (川上研究室)

<http://www.optomater.kuee.kyoto-u.ac.jp>

## 「可視長波長域での発光素子実現に向けた新奇基板上への InGaN 量子構造の作製」

窒化物半導体 GaN の禁制帯幅は 3.4 eV (波長 365 nm 相当)、InN のそれは 0.6 eV ( $2\ \mu\text{m}$ ) であることから、それらの混晶 InGaN は、近紫外～近赤外での光デバイス用材料として期待されている。すでに、近紫外から緑色にかけての InGaN 系 LED やレーザダイオードが市販され、さらに青色 LED を利用した白色 LED による蛍光灯の置き換えが急速に進められている。ただし、このような高品位な発光素子が得られる波長域は近紫外～可視短波長域に限られ、材料が持つポテンシャル (波長 365 nm ～  $2\ \mu\text{m}$ ) を活かし切っているとは言い難い状況にある。その最大の要因は、GaN と InN の格子定数の違いにある。これら材料はいずれも六方晶系ウルツァイト構造を示すが、その格子不整合度は 11% にも及ぶ。その結果、例えば、GaN をベースとした GaN/InGaN/GaN のような薄膜多層構造 (量子井戸構造) においては、発光層である InGaN に大きな歪が発生している。それを弾性的な格子変形で内包できなくなったとき、格子不整合転位が発生して非輻射再結合中心として働くことが知られている。特に長波長発光を目指して In 組成を増すと歪が増大するためこの現象が起きやすく、発光効率が低下する。

本研究では、赤色など可視長波長領域での高品質 InGaN 発光素子の実現を目指し、新しい基板  $\text{ScMgAlO}_4$  上への InGaN の作製を提案している (*Appl. Phys. Exp.* 7, 091001)。この基板の概略図を図 1 に示す。この結晶の (0001) 面は、InGaN と同じ六回対称性を持っており、しかも、格子定数  $a$  が In 組成 17% の InGaN と一致することが特長である。したがって、 $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{N}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{N}$  ( $x > 0.17$ ) のように  $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{N}$  をベースとした量子井戸構造の作製が可能であり、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  発光層の歪を低減することが期待される。

同様の目的で ZnO 基板を用いる提案も他機関からなされているが、窒化物半導体と ZnO の界面での反応により、高品質な窒化物半導体を得ることは容易ではない。同じく酸化物である  $\text{ScMgAlO}_4$  基板においても同様の界面反応の懸念があったため、まずは、従来のサファイア基板上と同様の LED を試作し、特性を比較した。結晶の作製条件の調整は必要であったが、図 2 に示すように、青色 LED の試作に成功し、しかも光出力はサファイア基板上 LED と同等以上であった。この結果は、*Appl. Phys. Exp.* 8, 062101 に掲載され、Spotlight 論文に選ばれた。

目的とする  $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{N}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{N}$  ( $x > 0.17$ ) についても検討を進めており、構造の作製と光励起による発光特性の評価を行っている。結果の一例として発光強度の発光波長依存性を図 3 に示す。期待通りに  $\text{ScMgAlO}_4$  基板上で、赤色発光強度の顕著な増大が確認できた。今後は、物性評価と合わせ、素子化を進める予定である。以上述べた  $\text{ScMgAlO}_4$  基板上の窒化物半導体発光素子構造に関する成果は、2017 年の窒化物半導体国際会議に招待されるなど対外的にも注目を集めている。

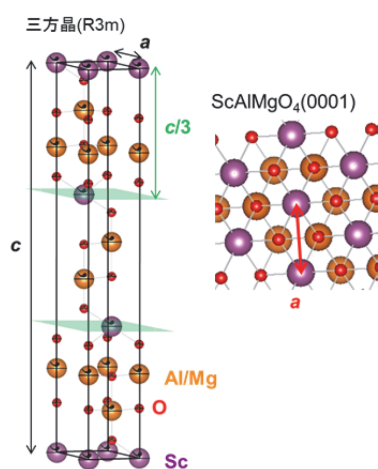
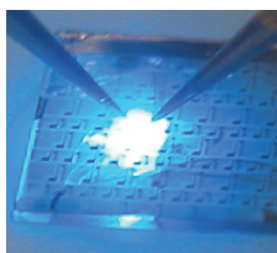
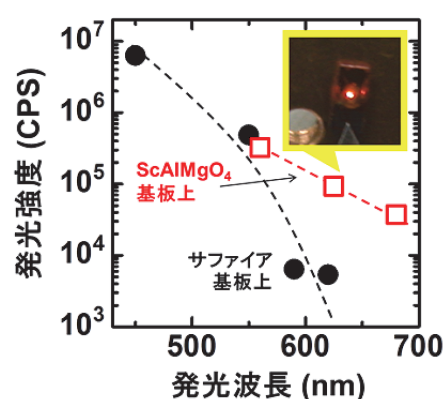
図 1  $\text{ScMgAlO}_4$  の結晶構造。図 2  $\text{ScMgAlO}_4$  上に試作した青色 LED。

図 3 室温での光励起発光強度の発光波長依存性。サファイア基板上と比べ、強い赤色発光が得られている。



# 光・電子理工学教育研究センター ナノプロセス部門 ナノプロセス工学分野

[http://pesec.t.kyoto-u.ac.jp/nanoprocess\\_eng/index.html](http://pesec.t.kyoto-u.ac.jp/nanoprocess_eng/index.html)

## 「クラスターイオンビーム誘起発光の応用研究」

クラスターイオンビームを半導体等の固体材料に照射すると、高効率かつ低損傷な表面加工や酸化膜の室温形成が可能であることが報告されてきました [1]。クラスターイオンが固体表面に衝突する際の反応過程については分子動力学計算による研究が進められ、衝突するクラスターイオン及び衝突された固体表面が高温・高圧状態になることが報告されています [2]。この様な高温・高圧状態においては、クラスターを構成する分子や、固体表面の原子の運動エネルギーが上昇し、また衝突頻度が上昇するため化学反応の促進が予想されます。クラスターの生成によく用いられるアルゴンガスではなく、エタノールやアセトン等をクラスター材料として用いると、希ガスを材料としたクラスターイオンの衝突で支配的な原子衝突に加えて、化学反応が寄与することにより、高いスパッタ率を実現できることが分かっています [1]。

最近、数 kV の電圧で加速したクラスターイオンが固体表面に衝突する際、微弱な発光があることがわかりました。この光を分析すると、クラスターイオンと固体表面との衝突時の表面状態、クラスターの状態、及び反応過程に関する情報が得られることが期待されますので、このクラスターイオンビーム誘起発光のスペクトルを測定するためにスペクトロメーターを開発しました [3]。図 1 にアルゴンクラスターイオンビームを鉄の表面に照射した際の、クラスターイオンビーム誘起発光スペクトルを示します [4]。丸は加速電圧 9 kV、四角は加速電圧 6 kV の場合の測定値です。光の波長 430 nm 付近のアルゴン由来のピークを解析することで固体表面への衝突時にクラスターイオンが高温になることを実験的に知ることが出来ました。また、図 2 に見られる様にアルゴンクラスターイオンビームを SiO<sub>2</sub> の表面に照射すると、SiO<sub>2</sub> 特有のピークが観測されました [4]。

この様にクラスターイオンビーム誘起発光のスペクトルを測定することにより、クラスターイオンと固体表面の衝突時の様々な情報が得られることが期待されますので、クラスターイオンビームによる固体表面加工・改質時の表面状態のオンラインモニタリングや、固体表面分析への応用につながる可能性があります。

[1] H. Ryuto, Applied Physics Express 2, 016504 (2009).

[2] C. L. Cleveland, U. Landman, Science 257, 355 (1992).

[3] H. Ryuto, F. Musumeci, A. Sakata, M. Takeuchi, G. H. Takaoka, Rev. Sci. Instrum. 86, 023106 (2015).

[4] F. Musumeci, H. Ryuto, A. Sakata, M. Takeuchi, G. H. Takaoka, Journal of Luminescence 172, 224 (2016).

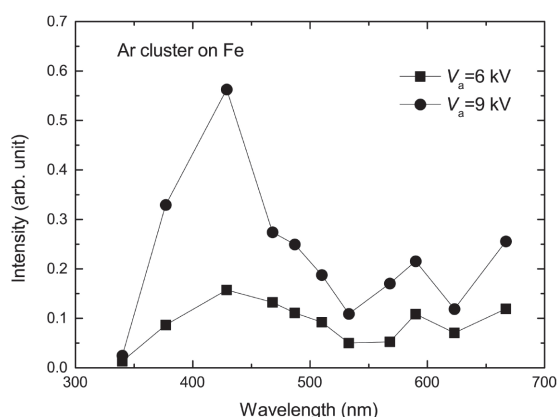


図 1 アルゴンクラスターイオンビームを鉄に照射した際の、クラスターイオンビーム誘起発光スペクトル。丸は加速電圧 9 kV、四角は加速電圧 6 kV の場合の測定値を示す。

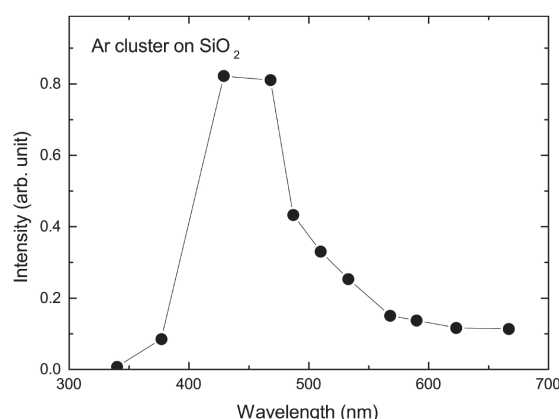


図 2 アルゴンクラスターイオンビームを SiO<sub>2</sub> に照射した際の、クラスターイオンビーム誘起発光スペクトル。

光・電子理工学教育研究センター デバイス創生部門 先進電子材料分野（藤田研究室）  
<http://pesec.t.kyoto-u.ac.jp/ematerial/index.html>  
 「ミストデポジション法」

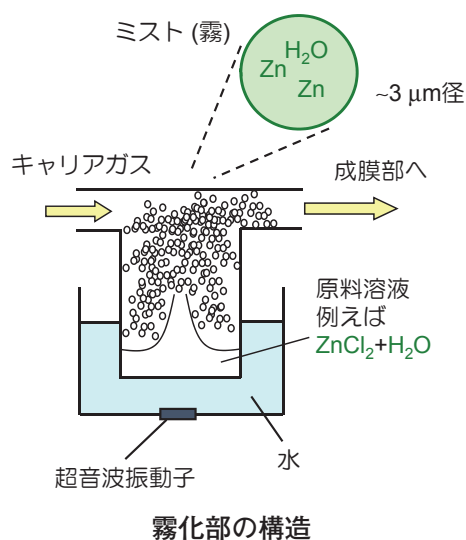
半導体の結晶成長というと、高価な装置を使いメンテナンスに苦労がかかることがいわば常識化している。筆者（藤田）も GaAs や GaN の結晶成長を経験してきたが、成長している時間よりもメンテナンスを行っている時間の方が長いという実感であった。これはひとえに不純物との戦い故で、中でも最も性質の悪い不純物は酸素とされている。なぜなら、酸素はほとんどの金属元素ときわめて容易に反応して、目的の結晶中に混入するためである。そのため、ひとたび空気に触らした部品は2日間程度温度を上げて脱ガスが必要となる。これは今も続けられていることである。

一方、2000年頃から、酸化物が従来の半導体と同じように機能することがわかってきた。インターネットで「酸化亜鉛（ZnO）」と検索すると、「白い粉」「化粧品」「顔料」といった語が出てくるが、われわれにとっての ZnO は単結晶の半導体である。この半導体の成長で問題となったのは酸素の空孔で、酸素を十分供給する雰囲気での成長が必須とされた。この考えは、従来の半導体成長における考え方を反転させるものである。となると、酸化物半導体に適した結晶成長技術を考える必要がある。ここで生まれたのがミストデポジション法により単結晶半導体を成長しようという考えである。ZnO という半導体を成長しようとすると、Zn の原料は水溶液でも構わない。なぜなら水は良い酸化剤であるためである。ただし水溶液は蒸気圧が低いので、溶液に超音波を印加してミスト（液滴）状にしてこれをキャリアガスで輸送する（図参照）。O の原料は酸素ガスでもよいが、前述の水がそのまま O の原料にもなる。用いる部品は水で洗浄すれば良いし、危険物を用いないため廃棄のガス処理も簡単である。

この技術を報告すると、必ずと言っていいほど受ける質問が、「そんな簡単な方法でデバイスに使えるような半導体を得られるのか」ということであったが、nm レベルでの膜厚の制御や多層構造の成長をすでに実証<sup>1)</sup>、また共同研究を行っている株式会社 FLOSFIA は、この技術を用いて酸化ガリウム（Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>）を成長し、低いオン抵抗（0.1 mΩ・cm<sup>2</sup>）と高い逆耐圧（531 V）を持つショットキーバリアダイオードを報告して<sup>2)</sup>、その事業を期している。

われわれは、この技術を用いて酸化物半導体をはじめ、SiO<sub>2</sub> や Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等を真空を用いることなく成膜できることを示した。これは下地の半導体層にダメージを与えにくいという特徴を示している<sup>3)</sup>。また多くの酸化物が成膜可能なことも実証してきた。この技術は、もともとは上記のように酸化物の成長に用いるものとして開発してきたが、最近になってさまざまな工夫をすることで、硫化物のように酸化物以外の材料が成長できるようになり、株式会社 FLOSFIA では Au や Cu など金属単体あるいは合金の成膜に成功している<sup>4)</sup>。また、本技術については、当研究室の出身者がそれぞれの研究機関（京都工繊大、京大工、京大エネ科、津山高専、鳥取大、高知工大、佐賀大など）においてその深化に大いに努力している。彼らの若い力にも支えられ、今後、広い産業分野での応用につながることを確信する次第である。

- 1) R. Jinno 他, Appl. Phys. Express **9**, 071101 (2016).
- 2) M. Oda 他, Appl. Phys. Express **9**, 021101 (2016).
- 3) T. Uchida 他, Appl. Phys. Express **7**, 021303 (2014).
- 4) 株式会社 FLOSFIA, プレスリリース, 2017. 4. 24.



## 知能メディア講座 言語メディア分野（黒橋研究室）

<http://nlp.ist.i.kyoto-u.ac.jp/>

### 「機械翻訳の実用化に向けて - ニューラルネットワークを用いた機械翻訳」

計算機による自然言語（人間が日常的に使う言語）間の翻訳、いわゆる機械翻訳の研究の歴史は古く、およそ 70 年前に開始されたと言われています。これまでにルールベース翻訳、アナロジーに基づく翻訳（または用例ベース翻訳）、統計翻訳などの手法が提案され、2014 年にはニューラルネットワークを利用したニューラル機械翻訳（Neural Machine Translation, NMT）が登場し、今では他を大幅に上回る翻訳精度を達成しています。2016 年 11 月の Google 翻訳の進化も NMT によるものであり、使ったことがある人はその向上ぶりに驚いたと思います。

黒橋研究室では以前から用例ベース翻訳を中心に機械翻訳の研究を続けていますが、昨年度からは NMT の研究開発も並行して行なっています。NMT は大きく分けてエンコーダー (encoder)、アテンション機構 (attention mechanism)、デコーダー (decoder) の 3 つのパーツで構成されています (図 1)。

エンコーダーではまず各単語を分散表現 (distributed representation) と呼ばれる、単語の意味を表すとされる数百次元からなる実数値ベクトルに変換するエンベディング (embedding) を行います。次に各単語を先頭から (forward) と末尾から (backward) 1 つずつ順に読み込んで行き、前または後ろの単語を考慮したベクトル表現を作り出します。この操作を実現するのがリカレントニューラルネットワーク (Recurrent Neural Network: RNN) です。

アテンション機構は、エンコードされた入力文と次に説明するデコーダーの内部状態を判断材料として、次の単語を訳出する際に注目すべき入力単語を推定します。1 単語訳出するごとに各単語の注目確率 (= アテンション) が再計算され、注目すべき箇所が毎回変化します。入力文の各単語の分散表現のアテンション確率による重み付き和をとることでコンテキストベクトル (context vector) を求め、これをデコーダーに渡します。

デコーダーは 1 つの RNN で構成されており、コンテキストベクトルと 1 つ前に出力した単語を考慮して次の単語を出力します。訳文は先頭から順に 1 単語ずつ生成され、文末を表す特殊記号 <EOS> が出力されると翻訳が完了します。RNN の出力は目的言語の語彙サイズと同じ次元のベクトルで、これがソフトマックス関数 (softmax function) により確率に正規化され、最も確率の高い単語が出力されます。以上が NMT 全体の概略で、学習時 (ネットワークの重みの調整) は、対訳コーパスを用いて各文が正しく翻訳されるように重みを確率的に更新します。100 万文規模の対訳コーパス全体に対して 10 回程度繰り返し更新を行うことで学習はほぼ収束します。

このように NMT では最初の入力文と最後の出力文以外の部分は全てベクトルなどの実数値で表現されており、翻訳の過程は数値計算で実現されています。モデル自体は非常にシンプルで使いやすくなりましたが、翻訳の過程の解釈は困難、もしくは不可能となっていました。またこれまでの翻訳手法のように入力文を置き換えることで翻訳するのではなく、入力文を見ながら翻訳文を先頭から順に作り出すため、翻訳されない部分や 2 回以上翻訳される部分が出てきてしまいます。さらに NMT では扱える語彙サイズが小さいため、低頻度語や固有名詞の翻訳に弱いという弱点もあります。これらの問題を解決することが今後の課題です。

本研究室で開発した NMT システムは国際的な機械翻訳評価ワークショップである WAT2016 において参加システム中トップの翻訳精度を達成しました (注 1)。また本システムは JST による日中・中日機械翻訳実用化プロジェクトにおいて、海外科学技術文献の日本語への機械翻訳のエンジンとして実用化されています (注 2)。さらに大手新聞社との共同研究を行っており、日本語新聞記事の英訳の下訳としての NMT の活用を検討しています。

(注 1) <http://lotus.kuee.kyoto-u.ac.jp/WAT/>

(注 2) [https://jipsti.jst.go.jp/jazh\\_zhja\\_mt/](https://jipsti.jst.go.jp/jazh_zhja_mt/)

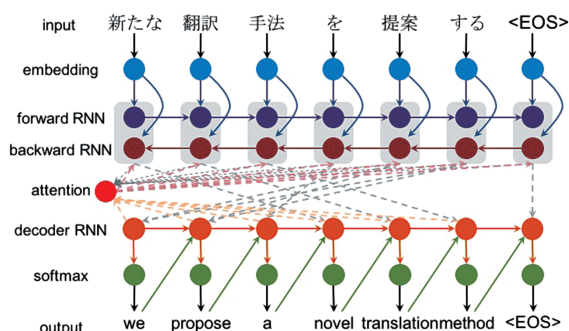


図 1 ニューラル機械翻訳の概略



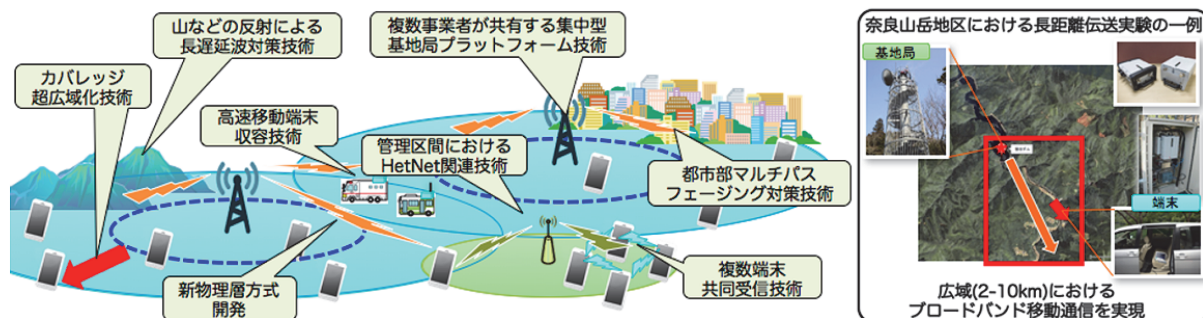
## 通信システム工学講座 デジタル通信分野（原田研究室）

<http://www.dco.cce.i.kyoto-u.ac.jp/>

### 「第5世代ブロードバンド移動通信システムに関する研究」

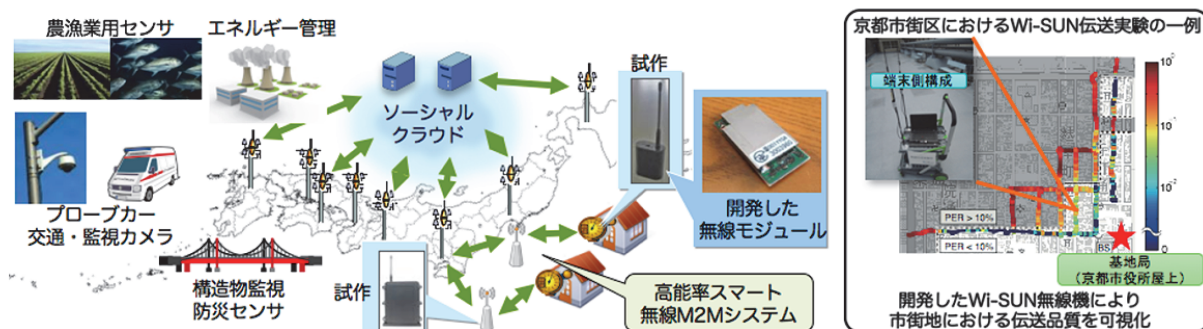
昨今、誰もが携帯電話を所持する時代となり、音声通話やメール機能のみならず、ソーシャルネットワークサービスや動画コンテンツ、ソーシャルゲームや株・金融サービスなど、伝送情報量の爆発的増大とともに、より高信頼性およびリアルタイム性のある通信サービスが要求されています。また、これまでの様に人と人の通信のみならず、“モノ”をインターネットに接続し、新たな価値創造を行うIoT（Internet of Things）など、新たな次元の無線サービス創出も期待されています。しかし、無線通信用途に使用可能な周波数資源には限りがあるため、今後益々周波数の枯渇逼迫が重要な問題になります。現在、第4世代移動通信システム（4G）としてLTEやWiMAX2などの高速移動通信網の普及が進んでいますが、先に述べた厳しいユーザ要求に応えるためには更なる技術革新が必要です。そこで現在、2020年代の実用化を目指した次世代の移動通信システム、いわゆる第5世代移動通信システム（5G）の研究開発が国際的に始まっています。

この様な国際的な動向も踏まえ、当研究室では5G実現に資する研究として、超広域ブロードバンド移動通信システム、新信号波形・新物理層方式の開発、複数事業者が共有する無線基地局プラットフォーム技術、端末共同超多重MIMO伝送技術、スマートIoT無線通信システム：Wi-SUNなどを中心に研究活動を進めています。特にVHF帯を用いた超広域ブロードバンド移動通信システム、スマートIoT無線通信システム：Wi-SUNに関しては一部商用化が開始されています。当研究室では机上検討のみならず、研究成果を実際に無線機に実装し、屋内外伝送実験を通じ評価し、その結果をまた机上検討にフィードバックさせるスタイルで研究開発を行い、卒業後すぐに一線で活躍できる人材育成を行っています。また、できるだけ多くの成果を社会実装させるために、内閣府、総務省の研究開発プロジェクトを自ら運営し、その成果を積極的に国内外標準化団体等にも提案しています。



※本研究の一部は総務省から受託した「電波資源拡大のための研究開発」によって実施しています。

#### 本研究室における第5世代ブロードバンド移動通信システムに関する研究開発概要



※本研究の一部は内閣府革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）「社会リスクを低減する超ビッグデータプラットフォーム」により、科学技術振興機構を通して委託された研究開発として実施しています。

#### 本研究室におけるスマート無線 M2M システムに関する研究開発概要



## 通信システム工学講座 伝送メディア分野（守倉研究室）

<http://www.imc.cce.i.kyoto-u.ac.jp/>

## 「データベース駆動型周波数共用システムにおける教師あり学習による共用条件更新方式」

無線周波数帯域の枯渇を解消するため、既存システム（一次利用者）に割り当てられた周波数を他の通信システムが二次利用する周波数共用が検討されている。共用周波数帯域では、二次利用者は一次利用者に強い干渉を与えないよう、二次利用者の通信を禁止する領域（通信禁止領域）や周波数帯域など周波数を共用するための様々な条件を設定する必要がある。周波数共用を実現する技術として、データベース駆動型周波数共用システムがある。あらかじめ各エリアにおける周波数の一次利用状況を収集し、周波数共用条件を算出し、データベース化する。二次利用システムは利用開始時に周波数共用条件をデータベースに問い合わせ、条件を守って運用する。しかし、たとえ周波数共用条件に従い二次利用システムが運用されている場合であっても、地形や建物などにより複雑に変化する電波伝搬の影響から、稀に一次利用者に強い干渉を与える場合がある。そのため、データベース上の周波数共用条件を適切に更新する必要がある。

我々は、二次利用者の通信が一次利用者に強い干渉を与えた場合において、周波数共用条件、特に通信禁止領域を、これまでの干渉発生情報と二次利用者の通信履歴をもとに適切に更新する方式を提案した [1]。一般に、通信禁止領域は広く設定するほど、一次利用者において強い干渉が発生する確率が低下する。しかし、過度に広い通信禁止領域は共用周波数を利用可能な領域まで通信禁止され、周波数の面的利用効率を低下させる。本研究では、干渉が発生する度に、干渉情報と通信履歴から教師あり学習を用いて強い干渉を発生させる可能性の高い領域を学習し、通信禁止領域として逐次更新する手法を提案する。初期の周波数共用条件として、一次利用者の周囲に通信禁止領域が設定されているとする。初期の共用条件に従って周波数共用開始し、一次利用者において強い干渉があったとき、一次利用者は干渉の発生時刻をデータベースに通知する。データベースではこれまでの通信履歴と干渉通知と同一時刻の通信を干渉源とみなしラベルを付与する。一方、それ以外の時刻の通信は干渉源ではないとラベル付けする。このラベル付きデータセットに対し教師あり学習アルゴリズムを適用し、強い干渉を発生させる二次利用通信の条件、ここでは領域を学習する。この領域を通信禁止領域として追加する。干渉通知の度に上述の手順で通信禁止領域を更新することで過度に通信禁止領域を設定することなく干渉発生確率を低減する。

図2に干渉発生確率に対する通信禁止領域面積のシミュレーション評価結果を示す。提案方式は従来方式に比べて干渉発生確率5%以下における通信禁止領域面積を削減した。

（参考文献）[1] A. Yamada, T. Nishio, M. Morikura, and K. Yamamoto, "Machine learning-based primary exclusive region update for database-driven spectrum sharing," Proc. IEEE VTC Spring Workshop on Connecting All Things for Enabling Smart Cities, Sydney, Australia, June 4 2017.

（謝辞）本研究は総務省の「電波資源拡大のための研究開発」の平成27年度案件として開始した「複数移動通信網の最適利用を実現する制御基盤技術に関する研究開発」の一環として実施した。

- 二次利用端末の送信位置
- 干渉発生時の端末送信位置

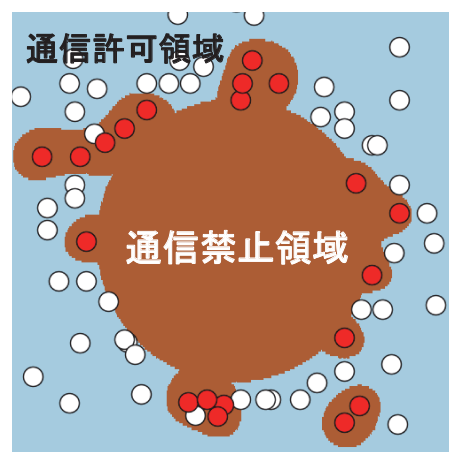


図1 通信禁止領域の設定例

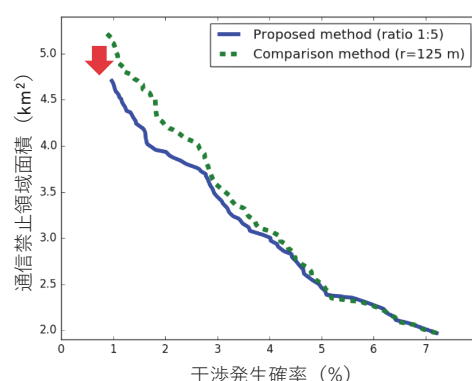


図2 シミュレーション評価結果

## システム情報論講座 医用工学分野（松田研究室）

<http://www.bme.sys.i.kyoto-u.ac.jp/>

## 「臓器変形・切除プロセスマッピング」

医用工学分野 松田研究室 医用システムグループでは、生体と治療を対象としたコンピューティングに関する研究を進めている。コンピュータビジョン、機械学習、人工現実感などの情報学的手法を医療に応用し、特に治療前や治療中において観測可能な情報から人体臓器の形態や特性を認識、理解する技術の探求、次世代の医療を牽引する情報技術の創出を目指している。本稿では、手術支援への応用を目指した試みの一つを紹介する。

外科手術における腫瘍切除は多くの診療科において実施される基本手技の一つである。臓器機能の温存と手術時間の短縮のためには正確な腫瘍位置の同定、術中解剖の理解が必要不可欠であるが、近年普及しつつある内視鏡手術やロボット手術においては、臓器表面や切除の進展によって出現する一部の脈管を視認することしかできない。また、手術時には術野の確保や臓器に対する切除や変形などの手術操作により臓器形状は時間変化する。術中における臓器形態の理解や腫瘍位置の正確な同定のために、超音波計測、術中 CT (Computed Tomography), Open MRI (Magnetic Resonance Imaging) などの種々の計測が試みられてきたが、高度なイメージング機器が利用可能な施設は限られるだけでなく、追加の計測に伴う手術時間、医師・患者双方の負担の増加が課題となっている。

本研究では、患者固有の術前 CT / MRI 画像から術中に想定される臓器変形を予測し、切除時に想定される臓器内部の脈管構造の三次元分布や腫瘍位置等の参照情報を半自動的にバーチャルガイドとして生成する臓器変形・切除プロセスマッピング (図 1) の概念を提案した。切離時に想定される臓器の位相構造の変化を事前知識として保持するメッシュモデルを導入し、メッシュを患者固有の術前 CT/MRI 画像に位置合わせすることで、切離の進展に伴って出現する脈管構造の可視化を達成しつつ、視覚表現の質と実時間性の両立を可能とする。図 1 (a) は肝癌及び肺癌に対する切除術において想定される脈管構造の外観を描出したシミュレーション画像であり、それぞれ切離面上に出現する肝静脈、肺動脈と肺静脈の一部が可視化されている。バーチャルガイドは想定される術中変形や位置ずれを考慮して複数パターン生成しておくことが可能であり、手術前における手術戦略の共有や、術中における意思決定支援への活用が期待される。図 1 (b) は肝切除時における術中カメラ画像と、医師によって事前に生成されたシミュレーション画像である。京都大学医学部附属病院 肝胆膵・移植外科、呼吸器外科、泌尿器科と共同で、シミュレーション画像の術中ガイドとしての有効性について臨床評価を進めている。術中カメラ画像の認識との連携に、モデルベースの腫瘍位置推定や処理のさらなる自動化へ向け、研究開発を進める予定である。

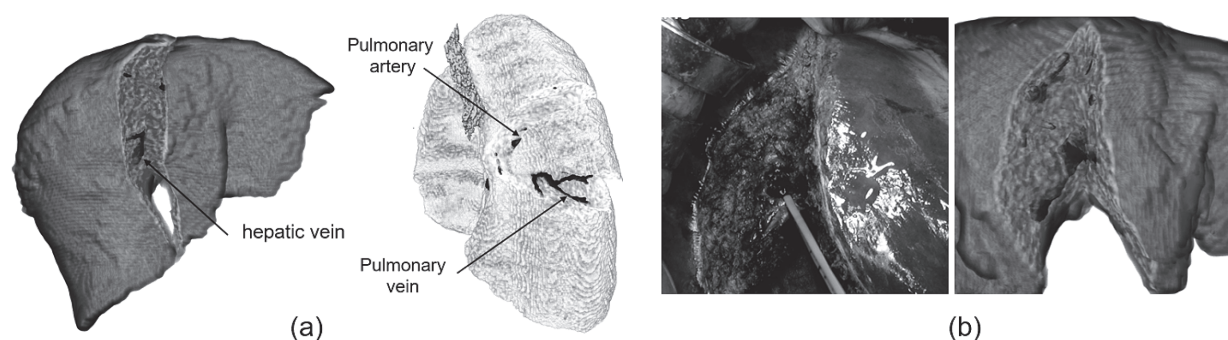


図 1. 臓器変形・切除プロセスマッピング, (a) 肝切除術と肺切除における患者固有切除ガイドの半自動生成結果, (b) 術中カメラ画像とシミュレーション画像

参考 URL :

<http://www.bme.sys.i.kyoto-u.ac.jp/~meg/research.html>

## エネルギー社会環境学講座 エネルギー情報学分野（下田研究室）

<http://hydro.energy.kyoto-u.ac.jp/>

## 「3次元配置した微小領域でのレーザ光拡散を利用した多視点裸眼立体視ディスプレイ」

これまで、3次元映像を表示する方式としては、パララックスバリア方式やプラズマを発生させる方式、LEDアレイを高速回転させる方式など、様々な方式が提案・実装されてきました。しかし、特殊な眼鏡を装着する必要がある、観察可能な領域が狭い、同時観察可能な人数が少ない、装置が大掛かりで高価になる、フルカラーの映像を提示することが難しい、輻輳調節矛盾が生じるなどの問題があり、これらの問題をすべて解決したディスプレイは開発されていませんでした。

本研究では、これらの問題を同時に解決する新しいディスプレイとして、3次元配置した微小空隙でのレーザ光拡散を利用した多視点裸眼立体視ディスプレイ LuminantCube を開発しました。LuminantCube は図1に示すように、光透過性素材で制作した直方体（以下、ガラスキューブ）とレーザ光源小型プロジェクタ、制御用PCで構成されます。ガラスキューブ内には、図2に示すように、事前にガラス内部マーキング法により多数の微小空隙（光を散乱させる傷）を3次的にほぼランダムに配置しています。この空隙は、通常照明下ではあまり目立たず、レーザ光が照射された場合にのみ、照射された色で発光しているように見えます。この発光は、ほぼ全方向から裸眼で認識可能なため、個々の微小空隙ごとに発光・非発光を制御することにより、周囲のどの位置からでも裸眼で観察できる任意の形状の3次元フルカラー動画を表示できます。さらに、輻輳角と焦点調節が矛盾しない表示方法ですので視覚疲労や酔いを誘発しにくいと期待されます。

ガラス内部マーキング法により生成した微小空隙は、プロジェクタからのレーザ光をすべては散乱させず、一部を透過させます。そのため、プロジェクタから見て同一直線上に複数の空隙を配置することができず、このことが解像度を上げる際の障害となります。そこで本研究では、複数のプロジェクタを用いて異なる位置からレーザ光を照射することにより、解像度を上げる試みを行いました。また、本方式では、同じ微小空隙に複数のプロジェクタから同時にレーザ光を照射することにより、輝度を向上させることもできます。図3に、プロジェクタを4台同時に用いることにより、約1000Luxの照明環境下で直方体と円柱を表示させた例を示します。このディスプレイは、設計支援、教育支援、デジタルサイネージ、インテリアなどに応用可能であると期待されます。

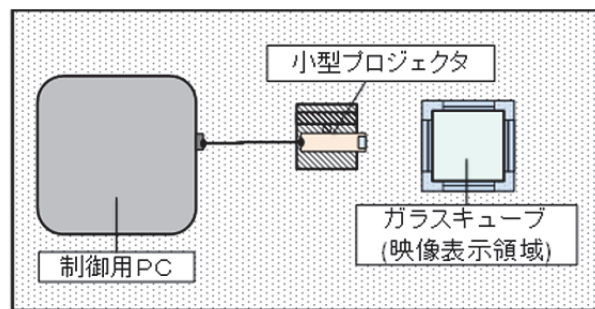


図1 ディスプレイの構成

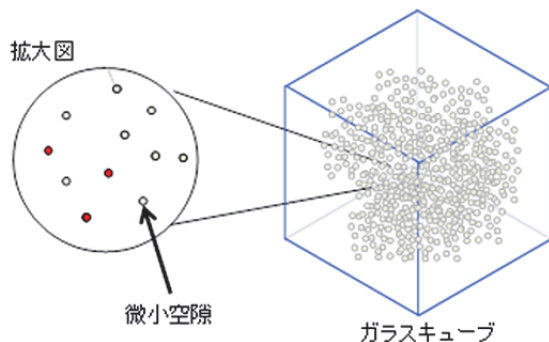


図2 ガラスキューブ内に配置した微小空隙

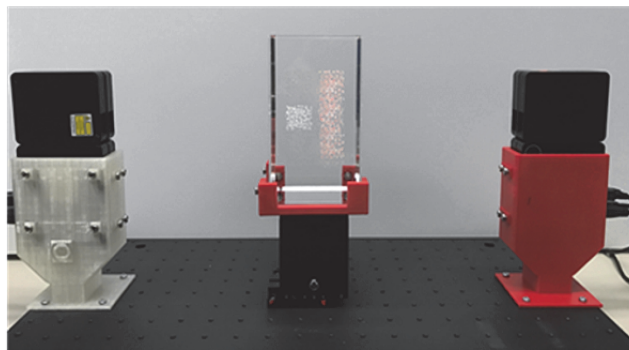


図3 立体映像の表示例



## エネルギー材料学講座 プロセスエネルギー学分野（白井研究室）

<http://www.pe.energy.kyoto-u.ac.jp/>

### 「伝導冷却高温超電導 MRI マグネットシステムの開発」

#### 1. はじめに

当研究室では、エネルギー問題にコミットする視点として、超電導応用エネルギー機器とこれらを導入した先進エネルギーシステムをテーマとしている。今回は、伝導冷却高温超電導 Magnetic Resonance Imaging (MRI) システムの開発について紹介する。現在の MRI 超電導マグネットには NbTi 超電導線材を用いているため、液体ヘリウムによる冷却が必要であるが、これを高温超電導線材を用い伝導冷却とすることで液体ヘリウムを用いないシステムが期待されている。当研究室では、NEDO「高温超電導実用化促進技術開発／高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発」プロジェクト（三菱電機・京都大学・東北大学）に参画し、医療用 MRI 超電導マグネットの高温超電導化を目指し、高均一かつ高安定磁場を発生できるモデルマグネットを試作（図1）し、イメージングによる実証（図2）を行った。

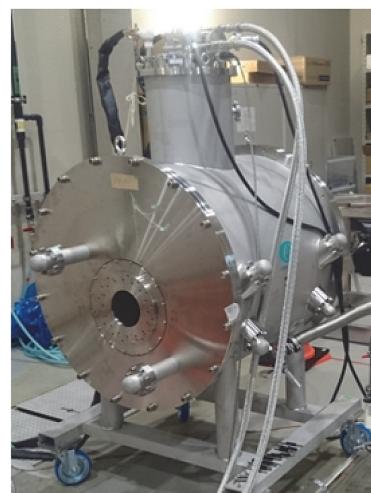


図1 HTS-MRI

#### 2. 高温超電導マグネットによる高安定磁場の発生

開発課題は、超電導特性が劣化しないコイル構造の開発、高精度のコイル製作方法、高均一磁場発生コイルの設計、高温超電導コイルでの高安定磁場発生などがあげられる。特に高温超電導マグネットでは、テープ状線材を往復して遮蔽電流が流れること、また現状では超電導接続ができないため、低温超電導マグネットで行われている永久電流モードでの運用が難しいこと

が、高安定磁場発生障害となっている。我々は、電源によるドライブモード運転での MRI イメージングに必要とされる変動 1ppm/h 以下の高安定磁場発生をめざし、図3に示すような超高安定励磁電源システムとその磁場制御システムの開発を行っている。

この高安定電源を用いてモデルマグネットを 3T まで励磁し、電源ドライブモードで 0.7ppm/h の磁場安定度を達成し、図2のネズミの胎児のイメージングに成功している。

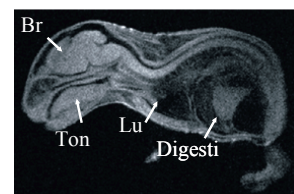


図2 ネズミの胎児のイメージング例

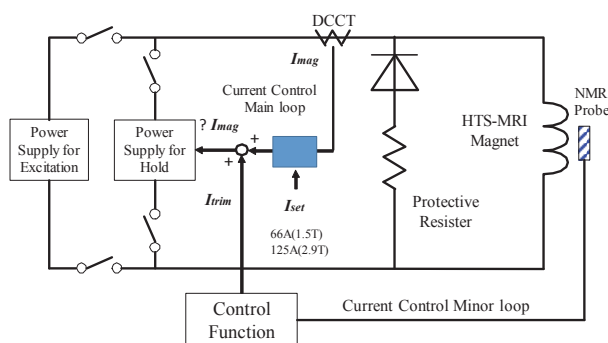


図3 超高安定励磁電源システム



## エネルギー機能変換研究部門 複合系プラズマ研究分野

<http://www.center.iae.kyoto-u.ac.jp/sanol/index.html>

### 「ヘリオトロンJ」における高速イオン励起電磁流体力学的(MHD)不安定性に関する研究

近年、環境問題やエネルギー問題を解決するため、持続可能な社会および地球環境の構築が求められています。そこで鍵を握るのが新エネルギー源の開発です。磁場で閉じ込めた超高温プラズマ中で熱運動によりイオン同士を衝突させ核融合反応を起こし、生成された高エネルギー粒子の運動エネルギーを発電に利用しようとするのが核融合発電です。核融合発電は低環境負荷、燃料が無尽蔵、高エネルギー密度、そして外部から制御可能であるといった特徴を有することから、持続可能な社会環境を支える基幹電力源となる可能性を秘めています。そのため、世界各国で研究開発が積極的に進められるとともに、国際協力下でフランスに建造中の国際熱核融合実験炉 ITER では、2035 年から重水素－三重水素(D-T) 核融合反応を起こす実験が計画されています。そのような情勢の中、本研究室も参加するヘリオトロンJグループではさらに先の実証炉、発電炉を見据え、より核融合炉に適した磁場配位（閉じ込め磁場容器）の最適化・探索ならびに高性能プラズマ閉じ込めを実現すべく、京都大学で独自に創案されたヘリオトロン磁場配位を発展させた立体磁気軸ヘリオトロン磁場配位を提案し、高温プラズマ実験装置「ヘリオトロンJ」を用いた原理実証を進めています。複数ある研究課題の中から今回は「ヘリオトロンJ」における高速イオン励起電磁流体力学的(MHD) 不安定性に関する研究」について紹介します。

前述の D-T 核融合では高エネルギー（高速）のアルファ粒子（ヘリウムの原子核）が核融合反応により生成され、プラズマ中の電子との衝突により電子を加熱します。この加熱により次の核融合反応が起き、その反応が繰り返され入力以上の出力が核融合反応により生み出されます。そのため、アルファ粒子のエネルギーが加熱されるプラズマの温度と同程度になるまでアルファ粒子が磁場によってしっかりと閉じ込められる必要があります。しかしながら、このアルファ粒子閉じ込めを阻害するものに、高速イオン励起 MHD (Magnetohydrodynamics: 電磁流体力学的) 不安定性との共鳴的相互作用が挙げられ、この不安定性によって核融合出力の低下が引き起こされる可能性があるため、核融合発電実現に向け解決すべき最重要研究課題の一つと捉えられ精力的に研究が進められています。高速イオン励起 MHD 不安定性の本質は粒子－波動間の共鳴的相互作用であり、同様の現象は地球を取り巻く磁気圏などでも太陽風由来の高エネルギー粒子に起因して起きています。高エネルギーアルファ粒子が MHD 波動と共鳴的相互作用を起こすと、MHD 波動が大振幅の電場、磁場振動を伴い励起されます。すると、共鳴しているアルファ粒子軌道が影響を受け閉じ込めが悪化することが懸念されています。ヘリオトロンJではプラズマ加熱に用いる高エネルギー水素イオンを活用し (1) 高速イオン励起 MHD 不安定性の物理現象解明、(2) 高エネルギーイオン閉じ込めへの影響、そして (3) 不安定性の制御手法の確立を進めています。(3) の結果を紹介します。外部から 70GHz のマイクロ波を新たにプラズマに入射することで、観測されていた高速イオン励起 MHD 不安定性の振幅が減少することを示したのが右の図です。右の図は横軸が時間、縦軸が振動の周波数を表し、色（明るさ）が振動強度を表す等高線表示となっています。マイクロ波強度を 100kW（上図）から 300kW（下図）にすることで明るい色で表された不安定性強度が減り、全体的に暗くなり振動が減少していることがわかります。現在、この抑制の物理機構解明に向け実験や数値解析を進めております。

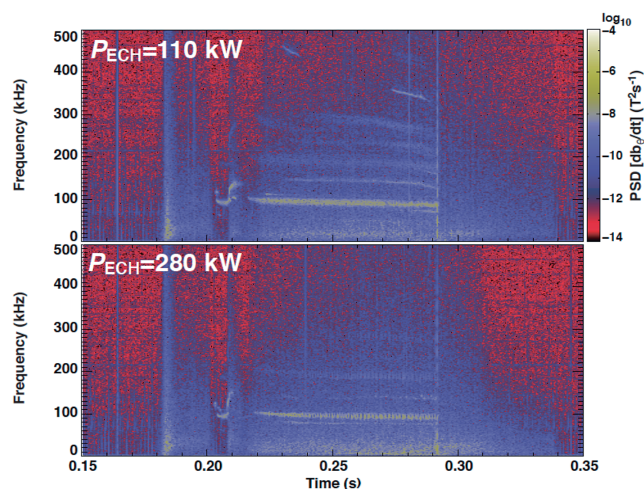


図. 高速イオン励起 MHD 不安定性のマイクロ波による抑制。

# 生存圏研究所 生存圏診断統御研究系 大気圏精測診断分野

<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/lasd/>

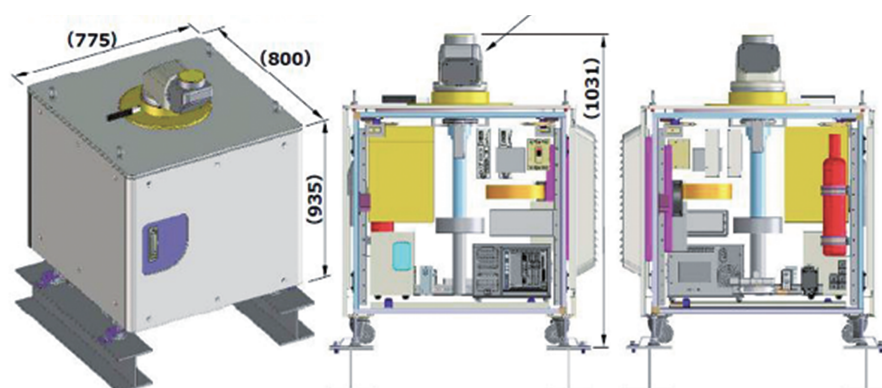
## 「小型高性能コヒーレント・ドップラー・ライダーの開発」

LIDAR (Light Detection and Ranging: ライダー) は光を用いたリモートセンシング技術の1つで、パルス状に発光するレーザー照射に対する散乱光を測定し、遠距離にある対象までの距離やその対象の性質を分析するものです。ライダーは大気中に浮遊するエアロゾルによるミー散乱や空気分子によるレイリー散乱を観測することができ、大気の散乱と大気分子の吸収を組み合わせた差分吸収法やラマン散乱法を用いてガス状物質の濃度分布を測定することも可能です。コヒーレント・ドップラー・ライダーは十分にコヒーレント性があるレーザー光と望遠鏡を用いて大気中のエアロゾルが移動している様子を検出し、散乱光のドップラーシフトを利用して散乱体の移動速度から風向風速を測定することができます。

現在、このコヒーレント・ドップラー・ライダーをさらに小型化、高性能化を行なっています。コヒーレント・ドップラー・ライダーは大きく分けて、ライダープロセッサ、スキャンヘッド、演算処理コンピュータ部、望遠鏡、レーザーアンプで構成されています。ライダープロセッサと演算処理コンピュータでレーザーの送受信の制御を行い、アンプでシードレーザーを増幅し送信を行っています。スキャンヘッドはレーザー本体上部に設置されているレンズを、方位角 0~360 度、仰角 -10 度~90 度の範囲で動くように制御しています。この研究開発では、各コンポーネントを見直し、全体的に小型化することに成功しました。

レンジ分解能は、信号処理によって最小 10m、最大 300m まで選択でき、レンジ分解能に応じて計測可能距離が変わる仕組みになっています。シードレーザーは最大出力 40mW、パルス幅は可変で代表的なパルス幅は 400ns、200ns、100ns などが選択でき、中心波長は 1543nm、レーザー安全レベルでクラス 1M のアイセーフとしています。

これまでの研究では、コヒーレント・ドップラー・ライダーの観測データを高分解能気象予報モデルに同化し、局地的豪雨の予測精度向上も行なっています。ドップラー・ライダーで得られた風の情報、特に風の変化が急激に起こったタイミングを気象予報モデルに同化することで、局地的豪雨の予測精度が向上する結果を得られています。これまではコヒーレント・ドップラー・ライダー 1 台のみの観測でしたが、2 台以上設置することでデュアル観測ができ、より正確な風の 3 次元情報を得ることができます。また使用している気象予報モデルの分解能は現在 100m ですが、都市のビル群、樹木などの影響も考慮にいられる、ラージ・エディ・シミュレーションモデルを活用することで、数 m 分解能まで向上させることが可能となり、特に人口が集中し、ひとたび局地的豪雨が発生すると社会的影響の大きい都市における極端気象予報の精度向上につながると期待されます。



開発した小型高性能コヒーレント・ドップラー・ライダー

## 生存圏開発創成研究系 生存科学計算機実験分野（大村研究室）

<http://space.rish.kyoto-u.ac.jp/omura-lab/>

### 「日本における巨大地磁気誘導電流の可能性について」

太陽活動や宇宙天気が私達の身近な社会に大きな影響を与えることがあります。その一つが人工物に流れる地磁気誘導電流（GIC：Geomagnetically Induced Current）です。太陽表面で生じたフレアは時折宇宙空間に向かって高エネルギーの磁気雲を放出し、磁気雲が地球の磁場に衝突すると地球周辺の磁気圏内に複雑な電流系が生じます（図1）。こうした磁気圏電流の電磁エネルギーの一部は地表へ伝搬し、地磁気の時間変動や誘導電場（GIE：Geomagnetically Induced electric field）という形で日々観測されています。電力網において発電所や変電所の変圧器の中性点は安全のため地面に接地されていますが、GIEが生ずると図2に示したように中性点を通して送電網に電流（GIC）が流れます。GICは変圧器の磁気飽和等を引き起こし、送電網に障害を与えます。1989年3月13日にはカナダのケベックで、2003年10月30日には、南スウェーデンのマルメで、GICによる大規模な停電が発生しました。オーロラ活動にともなう電離圏電流の影響の強い高緯度地域ではGICへの研究や対策が盛んに行われているのに対し、日本におけるGIC障害については注目されてきませんでした。1000年に一度の規模の大磁気嵐に伴い巨大GICが生じた場合、社会的な大災害となり得るとして近年注目を集めています。

先行研究としては、地球を水平一様構造と仮定した解析解や、周波数領域での3次元シミュレーションが多くなされています[1]。一方、日本のGICにおいては磁気圏極域から地下までの電磁エネルギーの伝搬や、日本の複雑な地下構造を考慮する必要があるため、実空間における3次元数値シミュレーションが重要と考えています。また、電力系統は広大かつ複雑なネットワークを成しており、GIEから送電網を流れるGICを見積もるためには、送電網全体のトポロジーや電気的なパラメータが必要となります。図3は日本の地下構造と送電網を模擬したGIEとGICの計算の初期結果です。国内電力会社の変電所に設置した電流計のデータを比較するとともに、計算精度を高め現実的なパラメータを導入することで磁気嵐の規模に応じて流れるGICの値を求め、減災や被害予測の想定に貢献することを目指しています。

#### 参考文献

[1] Pirjola, R. Surveys in Geophysics (2002) 23: 71. doi:10.1023/A:1014816009303

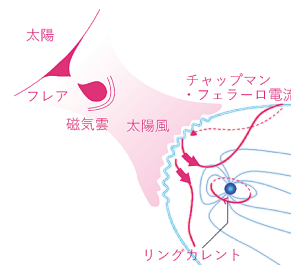


図1：太陽磁気雲と地球磁気圏の概略図

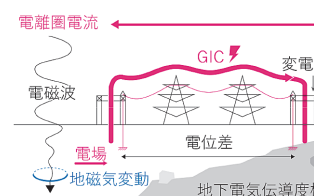


図2：GICの概略図

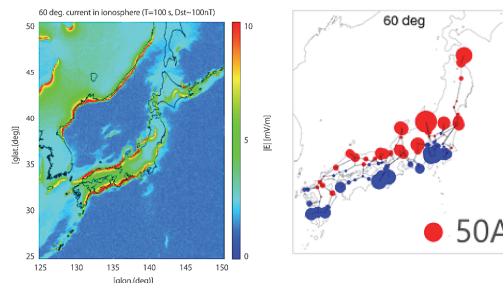


図3：計算した地磁気誘導電場（GIE）と地磁気誘導電流（GIC）



# 学術情報メディアセンター ビジュアライゼーション研究分野（小山田研究室）

<http://www.viz.media.kyoto-u.ac.jp/>

## 「因果関係の発見を支援するための視覚的分析 ―線虫における発生動態の解明―」

本研究室では、基礎生命科学ビッグデータを用いて行われる科学的方法において重要な因果関係の発見を支援するための視覚的分析環境の構築に関する研究を実施しています。

表現型特徴因果関係ネットワークをわかりやすく可視化することは、そこからの新たな知識の発見を促進する上で必要不可欠です。時間変化する特徴量間の因果関係を可視化するために階層グラフレイアウトの適用が考えられますが、この因果関係ネットワークは辺の数が多い密グラフであるため、これを階層グラフレイアウトによって可視化した場合に多くの辺交差が現れます。辺交差の発生は、可視化結果の美しさを損なうだけでなく、可視化結果の読み取りに悪影響を与えることが知られています。そのため、密な階層グラフに現れる辺交差を取り除き、視認性の高い可視化結果を生成することが課題でした。

このような辺交差を取り除く方法として辺集中化(Edge Concentration)に着目しました。辺集中化は、階層グラフに含まれるバイクリーク（完全二部部分グラフ）を抽出し、集中化ノードを用いて置き換えることで辺交差の除去を行います。しかし、既存の辺集中化アルゴリズムでは、表現型特徴因果関係ネットワークのような大規模なグラフにおいて辺交差の除去を十分に達成することができませんでした。そのため、辺集中化後の辺数の最小化に基づいた新たな辺集中化アルゴリズムを開発し<sup>1)</sup>、表現型特徴因果関係ネットワークへの適用を行いました。提案手法は既存手法と比較して、大規模なグラフに対しても効果的に辺交差の除去を行うことができ、また、計算時間の観点でも優れています。図1は表現型特徴因果関係ネットワークの可視化結果を表しており、左は辺集中化適用前、右は辺集中化適用後の結果の図です。辺集中化適用前の辺交差数が8663であるのに対して、辺集中化後の辺交差数は4035であり、およそ53パーセントの辺交差の除去が達成できました。

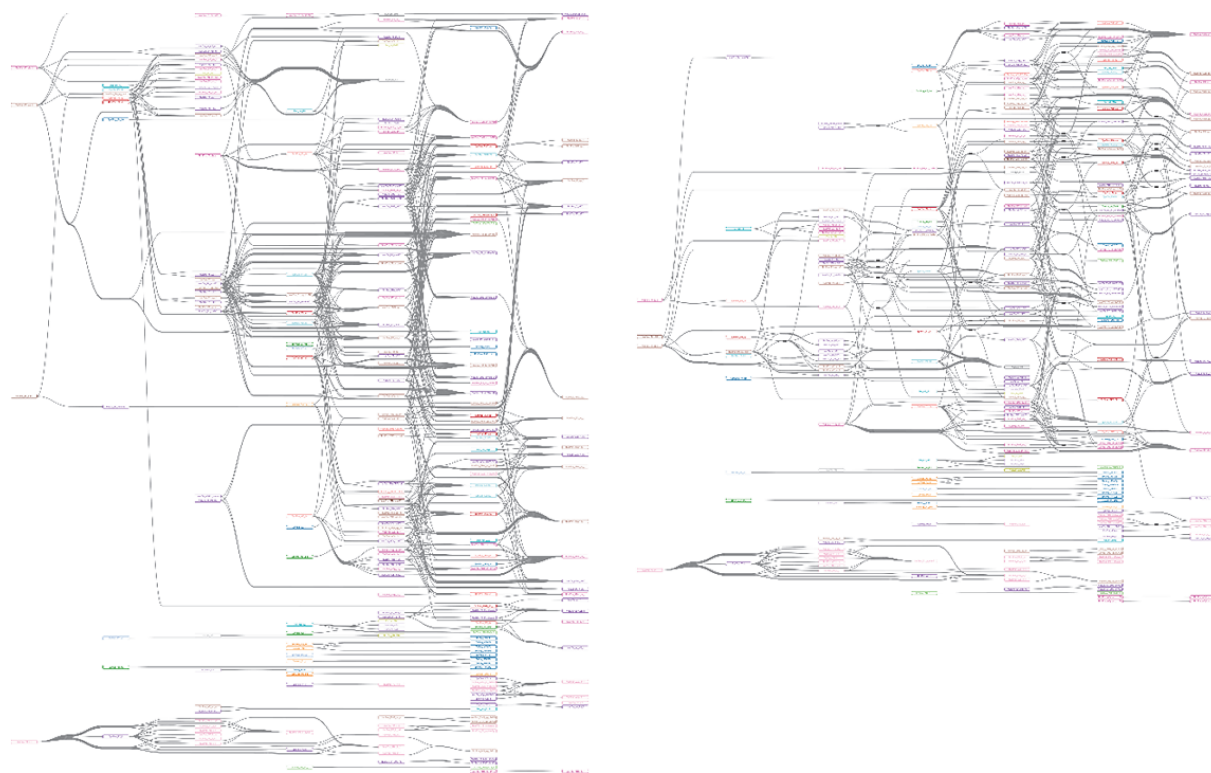


図1：表現型特徴因果関係ネットワークの階層グラフレイアウトによる可視化結果  
（左：辺集中化適用前、右：辺集中化適用後）



学術情報メディアセンター 教育支援システム研究部門 遠隔教育システム研究分野 (中村裕研究室)  
<http://www.ccm.media.kyoto-u.ac.jp/>  
 「動作支援と見守りのための体性感覚呈示デバイス」

我々の研究室では、動作の支援や情報伝達の手段として、皮膚感覚を用いた新しいデバイスを設計している。相手に所定の動作を促したり、そのタイミングを指示すること、相手との協働を円滑にすること、お互いの動作を直感的な方法で伝えることにより、共感 (empathy) を得ることなどを目的としている。応用としては、スポーツやリハビリテーション動作等のコツ・タイミングを教えること、注目を促す場合や危険が迫った場合の注意喚起、遠隔地の相手の状態を直感的に感じ取るデバイスその他が考えられる。

このような目的で試作した Skin Stretcher 型デバイスを図 1, 2 に示す。デバイスが皮膚を引っ張り、それに伴う違和感によって、装着者が動作を行う (この例では頭部を回転させる) ことを目的とする。このようなデバイスはこれまでに例を見ないものであり、また、人間が系に含まれるために複雑な振る舞いを持つ可能性があるため、その基本的な性能を確認することが重要となる。そのため、入力为本デバイスによる皮膚の変位 (頭部の回転角に換算)、出力を装着者の頭部の回転角とし、ステップ入力などの簡単な入力を与えながら、系の基本的な特性を計測し、モデル化を行った。そのベースとなる性質としては、2～3 次の遅れとむだ時間の存在するモデルを仮定した。図 3 に動作例とシステム同定によって得られた動作推定例を示す。青色が入力、黒色が出来、赤色がシステム同定で得られたパラメータ (伝達関数) を用いて出力を推定した結果を表す。上段は 2 次遅れ + むだ時間のモデルとして同定した場合、下段は 3 次遅れ + むだ時間の場合の例である。これらは一回の試行 (入出力) から伝達関数を推定した結果であり、そのような場合には、個々の動作は比較的単純なモデルで良く近似できる。

このような考え方を基に、装着者を支援する人間機械系を構築することにより、装着者の行動をできるだけ妨げずに、動作を誘導するシステムの実現が期待できる。ただし、ここには示さないが、回転角によるばらつき、試行間のばらつき、個人差によるばらつきなどがあり、これらを利用者、利用状況に合わせて調整することが必要であり、今後の課題となっている。

井藤隆秀, 近藤一晃, 中村裕一, Jonathan Rossiter, "Skin Stretcher 型の頭部回転誘導デバイスの基礎的検討", HCG シンポジウム 2016, pp.517-524, 2016

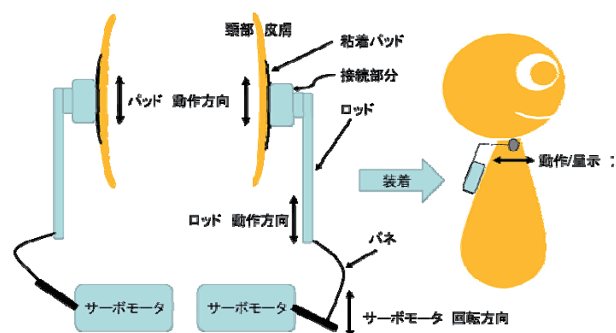


図 1: skin stretcher のしくみ



図 2: 装着時の様子

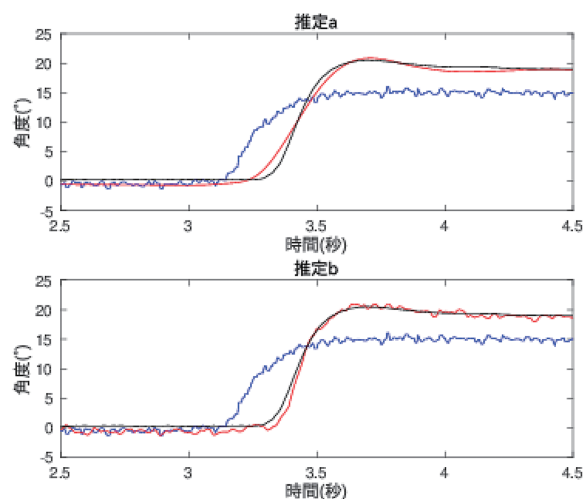


図 3: 入力, 出力, システムの近似